中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 7 期: 1374 ~ 1387
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

排山楼金矿韧性剪切带演化过程

倪金龙[①②], 刘俊来[②*], 唐小玲[③], 赵春强[②], 曾庆栋[④]

① 山东科技大学山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 青岛 266590;
② 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;
③ 山东科技大学化学与环境工程学院, 青岛 266590;
④ 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029
* 联系人, E-mail: jliu@cugb.edu.cn

收稿日期: 2013-06-28; 接受日期: 2013-10-05; 网络版发表日期: 2014-06-20
国家危机矿山项目(编号: 20089931)、国家自然科学基金项目(批准号: 90814006, 91214301, 41172089)和山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室项目(编号: DMSM201005)资助

摘要 野外地质调查、室内显微构造及石英 EBSD 组构分析等综合研究表明, 排山楼金矿区发育了三期韧性剪切活动, 并先后形成了东西向、北东向延伸的韧性剪切带. 前者主要表现为右行压扭活动, 后者切割了前者, 先后经历了左行压扭、左行走滑-伸展等多期构造活动. 东西向韧性剪切带中发育大量多晶石英条带与云母的显微构造分层现象, 形成于较深的地壳层次及中高温的环境下, 石英结晶学优选(CPO)表明石英以柱面<a>、柱面<c>滑移为主, 该剪切带可能形成于印支期, 是蒙古带与华北太古宇克拉通沿索伦-林西缝合带拼合作用在排山楼地区的一种构造表现. 北东向韧性剪切带早期的韧性剪切活动可能发生于~160 Ma, 是燕山运动早期活动的结果, 该期韧性剪切形成于中低温环境及中浅层地壳层次, 显微构造以多晶石英集合体和石英的亚颗粒旋转为代表, 石英以菱面<a>滑移为主. 晚期的韧性剪切以韧性变形为主, 叠加了后期脆性变形, 主要表现为低温变形的左行走滑-拆离伸展, 发育石英低温颗粒边界迁移、膨凸重结晶和方解石机械双晶, 形成于地壳较浅层次, 可能与 130~120 Ma 期间华北克拉通岩石圈大规模减薄与破坏作用有关, 该期韧性剪切与拆离伸展运动可能直接导致了排山楼金矿的形成.

关键词
排山楼金矿
韧性剪切带
显微构造
EBSD
演化过程

华北地块北缘发育东西向与北北东向韧性剪切带, 它们构成“棋盘状”韧性剪切系统(王汉霞和李世涛, 1988; 张晓晖等, 2002). 著名的排山楼金矿就位于这一“棋盘状”韧性剪切系统之中, 是在太古代变质岩区发现的韧性剪切带型大型金矿床(曲亚军等, 1992). 前人对该矿床地质、成矿年代及矿床成因等进行了较系统的研究, 形成了一些共识, 但也存在一些争议(李达和韩雪梅, 1995; 李俊建等, 2001; 杜建军等, 2007; 王荣湖等, 2008).

矿区韧性剪切带、容矿围岩、矿体、矿物及围岩蚀变等地质特征研究表明矿体分布严格受近东西向韧性剪切带控制(时信忠, 1991; 曲亚军等, 1992; 吴春林, 1992; 张耀华等, 1993; 李达和韩雪梅, 1995; 吴春林和孙厚江, 1996). 基于 Ar-Ar 法年代学分析,

中文引用格式: 倪金龙, 刘俊来, 唐小玲, 等. 2014. 排山楼金矿韧性剪切带演化过程. 中国科学: 地球科学, 44: 1374–1387
英文引用格式: Ni J L, Liu J L, Tang X L, et al. 2014. Evolution of the ductile shear zone of the Paishanlou gold deposits, western Liaoning, China. Science China: Earth Sciences, 57: 600–613, doi: 10.1007/s11430-013-4720-4

前人得出了太古宙成矿与晚中生代成矿两种观点, 因而就金矿的形成与东西向抑或北东向韧性剪切带有关展开了争论(骆辉和赵运起, 1997; 李俊建等, 2001; 罗镇宽等, 2001; 孟宪刚等, 2002; 王荣湖等, 2008).

前人的研究注意到韧性剪切带在成矿过程中的重要作用, 但是对该地区韧性剪切变形的特征、期次以及变形的环境等缺少深入研究, 这无疑对金矿的成因分析增加了障碍. 而显微构造、石英的 EBSD 组构分析能够提供变形期次、变形温度等信息. 因此, 本次研究在野外考察的基础上, 进行了详细的显微构造及石英组构的分析工作, 理清了该地区韧性剪切带的活动期次、变形温度与构造层次, 并结合研究区大地构造背景对排山楼韧性剪切带性质、活动期次及演化过程进行了探讨.

1 区域地质背景

排山楼金矿位于辽西阜新-锦州地区, 其大地构造位置处于华北地块北缘中段, 北邻兴蒙加里东-海西造山带南缘, 东接中、新生代下辽河盆地与另一太古宙次级地体相邻(图 1), 矿区南部紧邻医巫闾山(瓦子峪)变质核杂岩, 是发育于在太古宙结晶基底之上, 由东西和北东或北北东向棋盘状构造叠加所形成的、受复杂构造格局控制的一个大型金矿床.

区域上出露的地层主要有太古界建平群、中元古界长城系、中生界白垩系以及新生界第四系等. 研究区内岩浆岩广泛分布, 按照形成时间可将区内的岩浆岩分为古太古代和燕山期两大类(孙守恪等, 2012).

古太古代侵入岩广泛出露于研究区南东侧, 平面形态呈北东向延伸, 岩体侵入太古宙建平群片麻岩, 受后期韧性剪切作用改造, 改造后的主要岩石类型为二长花岗质糜棱岩、二长花岗质初糜棱岩及糜棱岩化二长花岗岩. 燕山期侵入岩发育, 主要出露岩体为尖砬子山岩体及医巫闾山岩体, 岩石类型为二长花岗岩和花岗闪长岩. 在花岗质岩体中普遍发育有石英脉、长英质的伟晶岩脉以及花岗细晶岩脉等各类脉体.

2 韧性剪切带的组成、结构与宏观变形

与区域上的“棋盘状”构造格局相吻合, 排山楼地区的韧性剪切带分别呈近东西、北东向延伸, 构成交织的网带状(图 1). 其中, 北东向韧性剪切带切割了东西向韧性剪切带.

2.1 东西向韧性剪切带

东西向韧性剪切带分布较宽, 可分为北带和南带, 北带为排山楼-五家子带, 南带为下营子-上家子带(图 1). 其中北带与金矿的赋存关系密切, 可分为两个部分, 即北部与南部. 其中, 北部位于排山楼至北营子一带, 南部位于二道沟-上两家子带, 二者均向东延伸出矿区. 该带主要发育于太古界建平群大营子组(Ar*d*)中, 排山楼大型金矿床和上两家子金矿床分别赋存于该韧性剪切带的北部与南部(图 2).

东西向韧性剪切带倾向北或北北西, 倾角 35°~70°. 糜棱面理构造由绢云母、黑云母和角闪石等片柱状矿物定向排列、石英定向拉长及细粒化基质组成的条带状体构成(图 3). 野外可识别两期拉伸线理, 其中, 早期拉伸线理倾伏方向为 290°~345°, 倾伏角 25°~45°; 晚期拉伸线理倾伏方向为 30°~45°, 倾伏角 25°~40°(图 4).

带内剪切应变组构主要表现为岩块、矿物集合体和长石残斑旋转, 旋转物的长轴与剪切叶理呈小角度相交, 构成 S-C 组构. 另外, 带内还发育了大量的“a”型、“b”型褶皱(图 5(a)). 野外根据剪切组构指向, 判定发生两次韧性剪切变形作用, 其中早期为右行剪切, 后期为左行剪切.

2.2 北东向韧性剪切带

矿区内发育两条北东向韧性剪切带, 西带为靳家店-排山楼韧性剪切带, 东带为二道沟-上两家子剪切带(图 2). 后者被燕山期二长花岗岩侵入. 该组剪切带与 NE-SW 向展布的脆性断裂带平行, 区域上构成了医巫闾山变质核杂岩系统拆离断层带的重要组成部分.

靳家店-排山楼韧性剪切带(西带)发育于中元古宇高于庄组(Ch*g*)、大红峪组(Ch*d*)中, 带宽 0.5~1.0 km, 向两端均延伸出矿区(图 2). 带内由一套中浅层次的糜棱岩类岩石组成, 剪切构造发育, 糜棱面理走向 NE-SW, 倾向 NW 或 W, 倾角 45°~75°. 拉伸线理倾伏方向为 220°~235°, 倾伏角 5°~15°. 野外观察可见大量的柔流褶皱(图 5(b)), 规模大小不一.

二道沟-上两家子韧性剪切带(东带)发育于太古

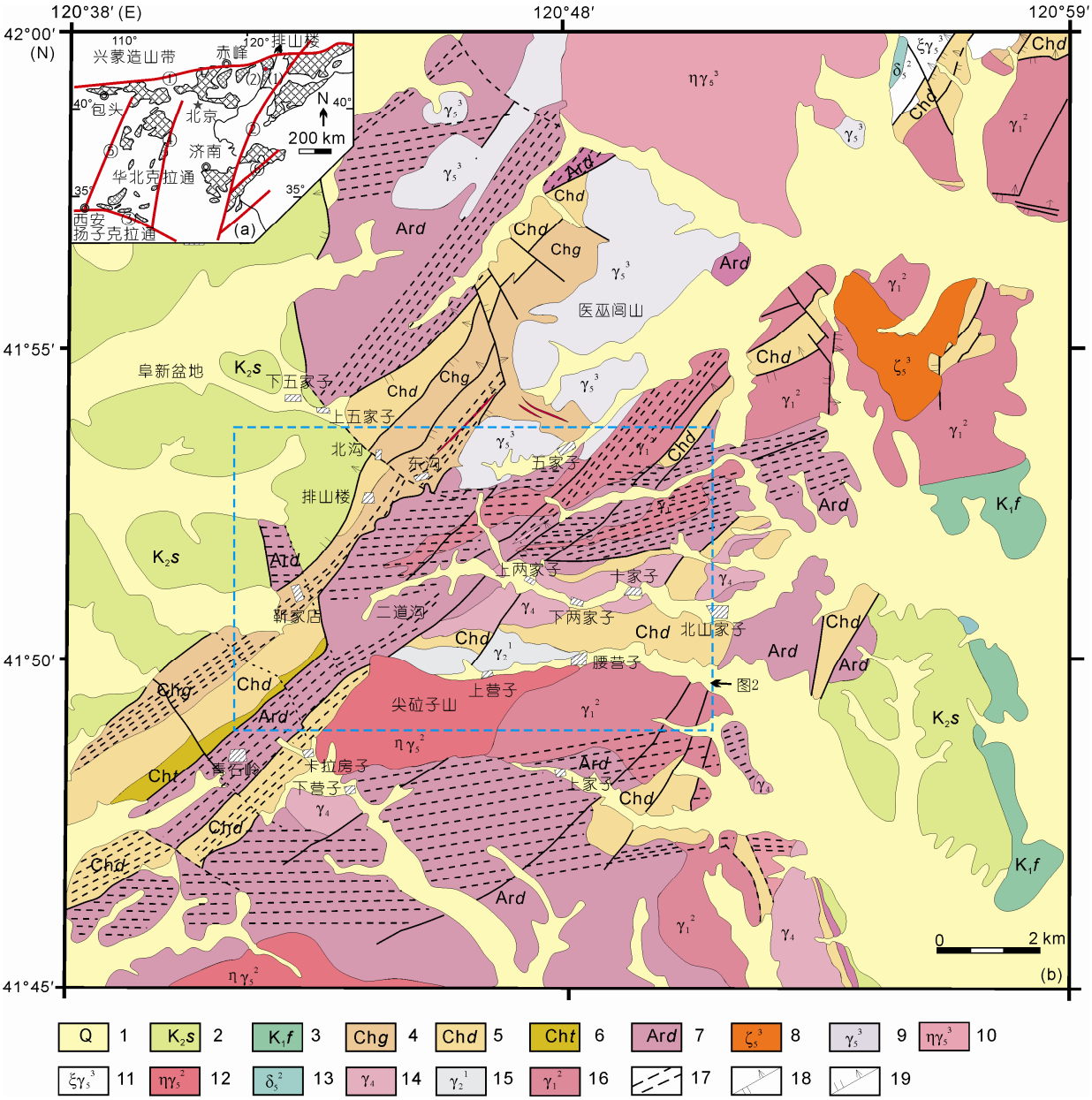

图 1　排山楼金矿大地构造位置(a)及区域构造简图(b)

1, 第四系; 2, 孙家湾组; 3, 阜新组; 4, 长城系高于庄组; 5, 长城系大红峪组; 6, 长城系团山子组; 7, 建平群大营子组; 8, 英安岩(白垩纪); 9, 花岗岩(白垩纪); 10, 二长花岗岩(白垩纪); 11, 正长花岗岩(白垩纪); 12, 二长花岗岩(侏罗纪); 13, 闪长岩(侏罗纪); 14, 晚古生代花岗岩; 15, 早元古代花岗岩; 16, 晚太古代花岗岩、斜长花岗岩、花岗闪长岩; 17, 韧性剪切带; 18, 压-压剪性断裂; 19, 张-张剪性断裂. ① 赤峰-开源断裂; ② 郯庐断裂; ③ 晓天-磨子潭断裂; ④ 太行山东断裂; ⑤ 华山-大同断裂; ⑥ 五莲-烟台断裂. (1) 下辽河盆地; (2) 阜新盆地. 据辽宁省有色地质局勘查总院(2007), 辽宁省排山楼金矿区域地质图和内部报告修编

界建平群大营子组(Ard)、中元古宇大红峪组(Chd)中, 带宽 0.2~0.4 km, 向两端延伸出矿区. 岩石组合类型主要有初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩及千糜岩等(图 3). 带内剪切构造发育, 糜棱面理走向北东, 倾向北西, 倾角 45°~65°, 拉伸线理倾伏向为 NNE-NE, 倾伏角为 15°~30°, 左行剪切组构发育, 该构造带中可见大型的牵引褶皱(图 5(c)和(d)), 褶皱的转折端张节理发育, 张节理被石英脉充填(图 5(d)). 野外判断该构

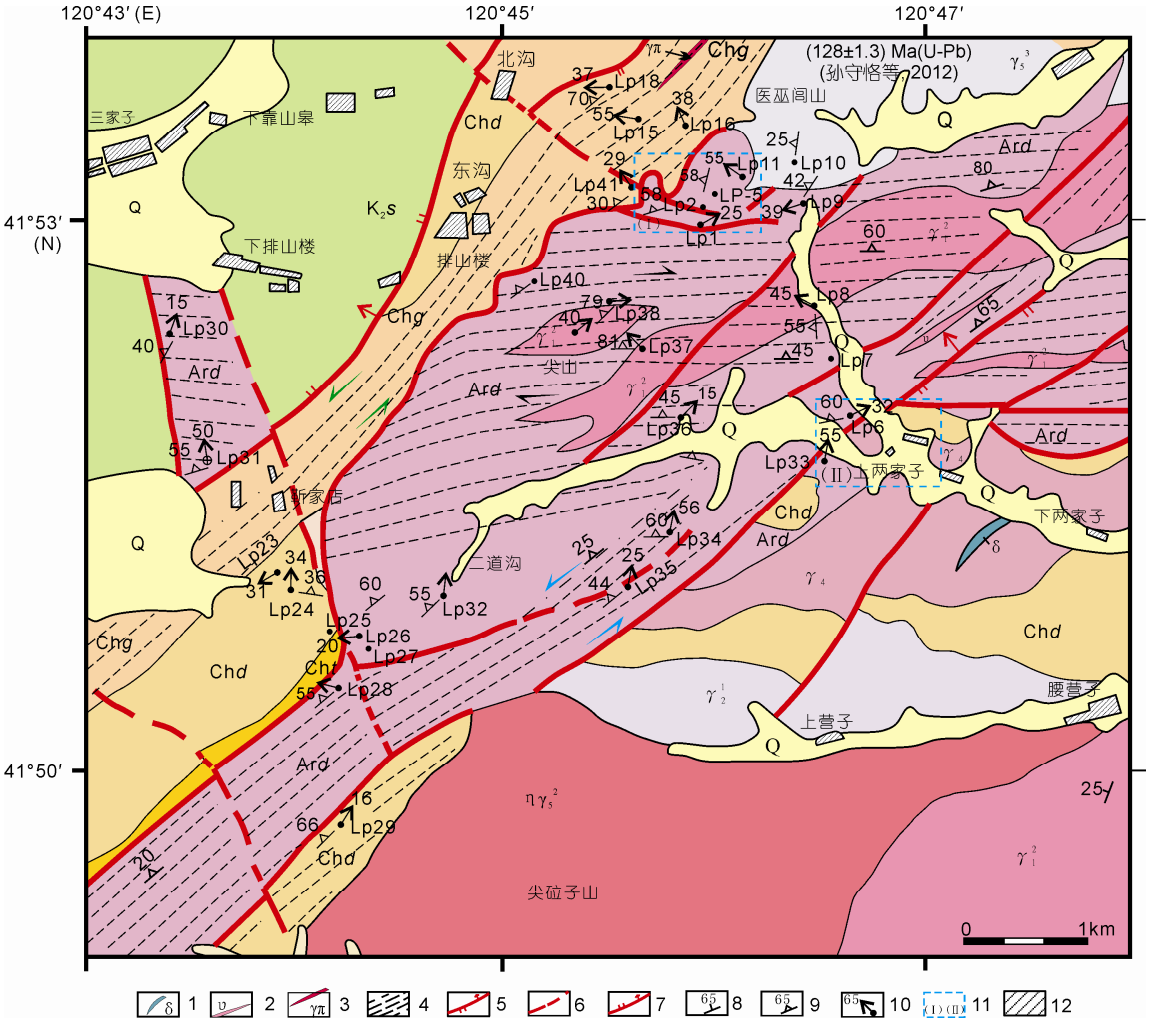

图 2　排山楼金矿区构造及实际材料图

1, 闪长玢岩; 2, 辉长岩脉; 3, 花岗斑岩; 4, 韧性剪裂带; 5, 压-压剪性断裂; 6, 实测或推测断层; 7, 张-张剪性断裂; 8, 产状; 9, 面理产状; 10, 线理产状; 11, 金矿区 ((Ⅰ) 排山楼矿区, (Ⅱ) 上两家子矿区); 12, 村庄(其他图例见图 1). 位置见图 1

造带曾遭受左行压扭作用.

3　韧性剪切带显微构造特征

排山楼矿区韧性剪切带在多期的构造活动中形成了丰富多彩的宏观和显微构造现象, 为进一步精确揭示该地区地质历史过程提供了丰富的证据.

3.1　显微构造特征的温度指示及变形期次

变形显微构造的形成不仅受原岩物质组成和结构影响, 同时取决于岩石变形时起主导作用的变形机制. 变形机制的差异往往取决于岩石变形时所处的构造层次及变形温度(Passchier 和 Trouw, 1996; Stipp 等, 2002). 依据显微构造形成机制的不同, 排山楼韧性剪切带显微构造现象大致可分为五个大类: 显微破裂作用、晶质塑性变形、粒间摩擦滑移、扩散物质迁移和多期构造叠加现象等(图 6).

排山楼韧性剪切带的显微破裂现象主要表现为晶内裂隙、穿晶裂隙、显微布丁和多米诺碎斑等. 晶质塑性变形主要表现为机械双晶(斜长石、方解石)、波光消光与带状消光(长石、石英)、亚晶粒化、动态重结晶、碎(残)斑系、条带状构造等. 粒间摩擦滑移现象则主要表现为 S-C 组构、云母鱼和显微分层等显微构造现象.

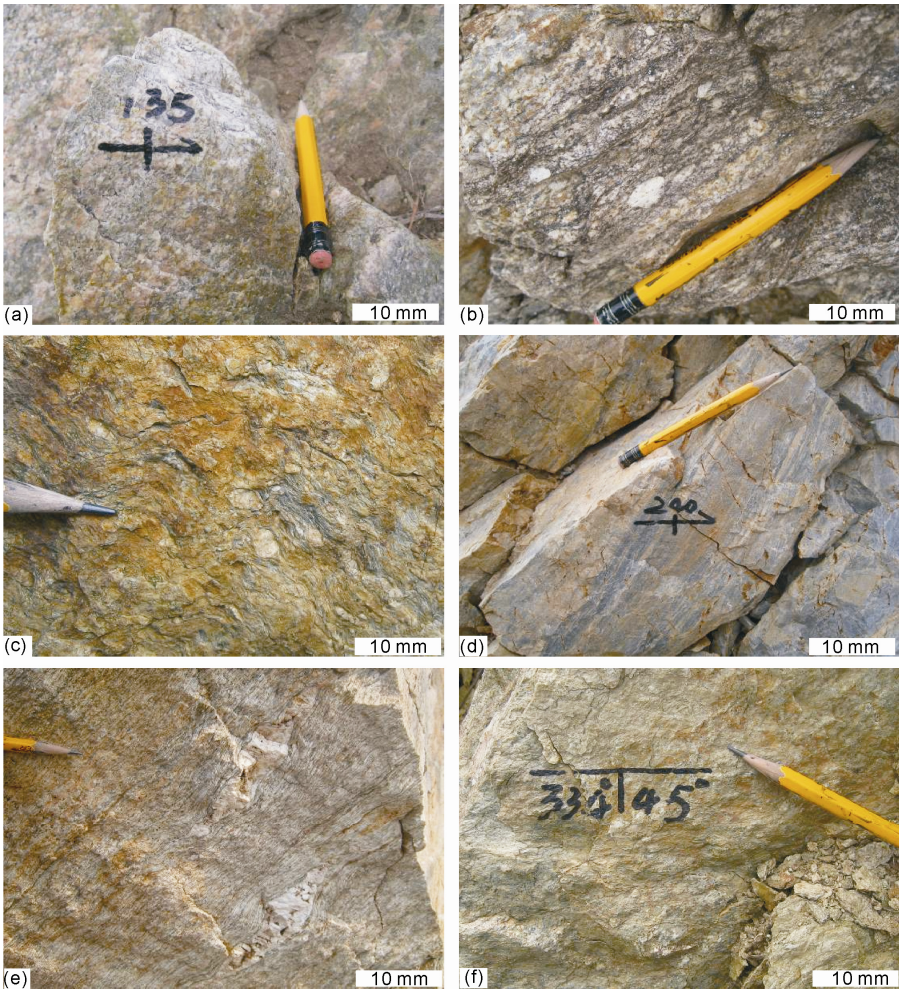

图 3　韧性剪切带中构造岩的宏观特征

(a) 花岗质初糜棱岩; (b) 黑云斜长糜棱岩; (c) 花岗质糜棱岩; (d) 长英质超糜棱岩; (e) 长英质糜棱岩; (f) 千糜岩

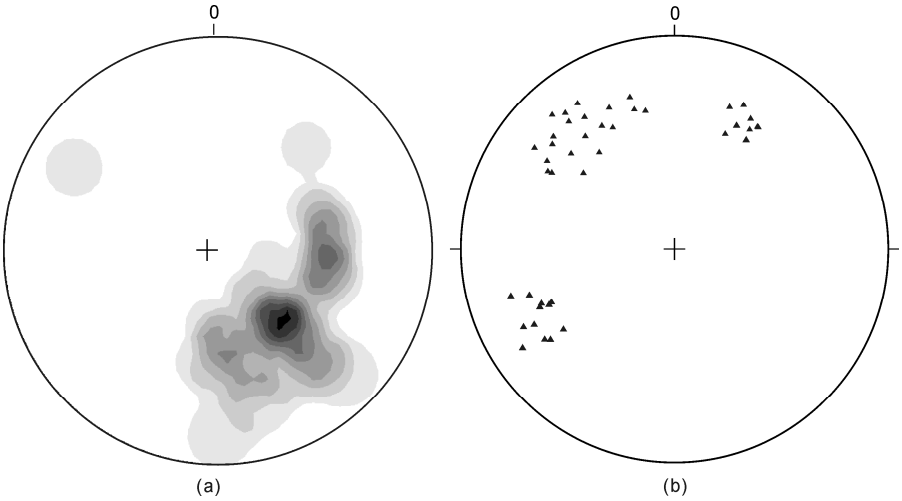

图 4　韧性剪切带面理与线理赤平投影

(a) 面理法线极密投影, 等值线 2-4-6-8-10-12-14-16%, 最大极密 18%, 共 55 个数据; (b) 线理投影, 共 55 个数据

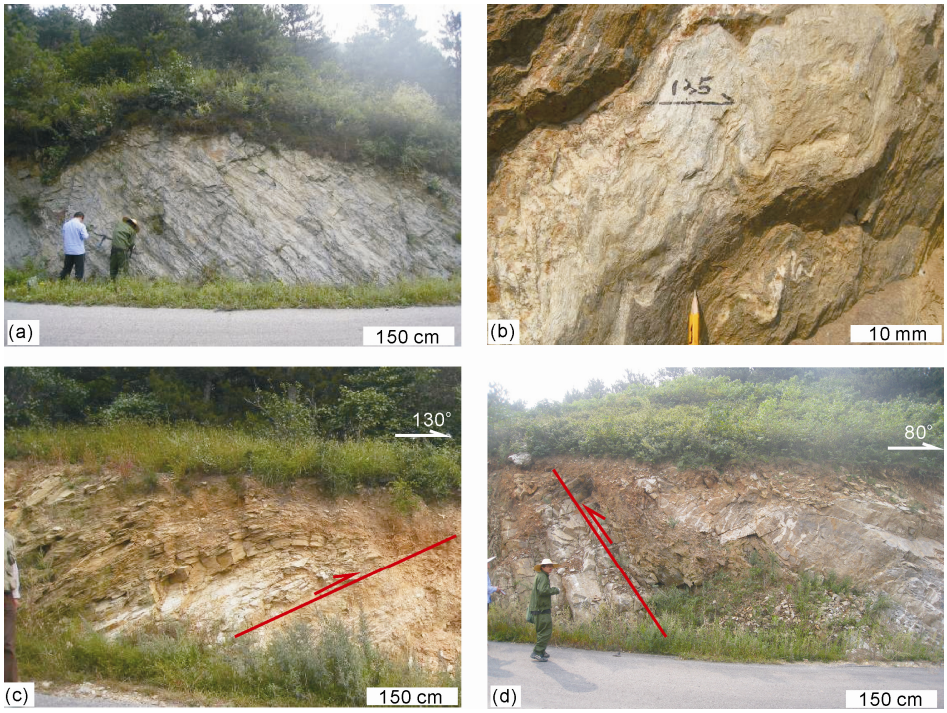

图 5　韧性剪切带中发育的大型构造

(a) 千糜岩中发育的“b”型褶皱; (b) 肠状褶皱示 NW 向 SE 向挤压; (c) 逆冲构造, 示 NW 向 SE 向挤压; (d) 挤压形成的牵引构造及张裂脉, 张裂脉被石英充填

上述显微构造现象广泛分布于东西向、北东向韧性剪切带中, 通常一块岩石薄片中可见到多种代表不同构造层次的显微构造现象, 显示了该地区经历了多期次、不同构造层次的构造叠加.

与北东向韧性剪切带显微构造现象不同的是, 东西向韧性剪切带普遍发育多晶石英条带、显微构造分层等构造现象(样品 Lp5, Lp6, Lp24, Lp27 和 Lp32), 显示了该构造带经历了构造层次较深、变形温度较高环境下的剪切活动. 中高温变形使石英亚颗粒旋转重结晶, 在高温动态恢复作用下, 石英颗粒形成了平直的边界, 如样品 Lp6(图 6(e)).

除了东西向剪切带的中高温变形作用外, 显微构造现象还揭示了排山楼地区经历了中、低温两期韧性变形变质作用. 主要表现为二道沟-上两家剪切带发育了石英的多晶集合体(图 6(c))、亚颗粒旋转重结晶(图 6(d))、长石的膨凸重结晶(图 6(f))等中温或中低温等显微构造变形现象; 低温韧性变形主要发育于靳家店-排山楼韧性剪切带, 显微构造表现为石英的膨凸重结晶(图 6(d))、晶内破裂(图 6(f))及方解石的机械双晶等发育.

3.2　显微构造特征的运动学指示

利用变形显微构造分析来判断剪切运动是近 20 年来显微构造发展得比较有成就的领域, 目前已积累了丰富的资料(Passchier 和 Trouw, 1996), 通过对定向标本把薄片恢复到野外实际产状, 利用变形显微构造判别剪切指向, 在微观尺度上是十分有效的(胡玲等, 2009). 排山楼韧性剪切带中具有运动学指向的显微构造主要有长石晶内破裂形成的书斜式构造(图 6(a))、长石残斑的旋转斑晶(图 6(c))、石英多晶集合体(图 6(b)和(d))与多晶石英条带(图 6(e))中的石英亚颗粒的定向排列等.

基于上述普遍发育的显微构造现象, 可以判定两组韧性剪切带均经历了多期韧性剪切活动. 其中, 东西向剪切带中经历了右行与左行剪切两种剪切形式; 北东向韧性剪切带经历了左行剪切活动. 由于 NE 向剪切带形成时间晚于东西向剪切带, 可以判定东西向剪切带早期经历了右行剪切活动, 晚期受 NE 向剪切带韧性变形的影响, 部分区段再次遭受韧性剪切改造, 经历了左行剪切变形(图 6(g)和(h)).

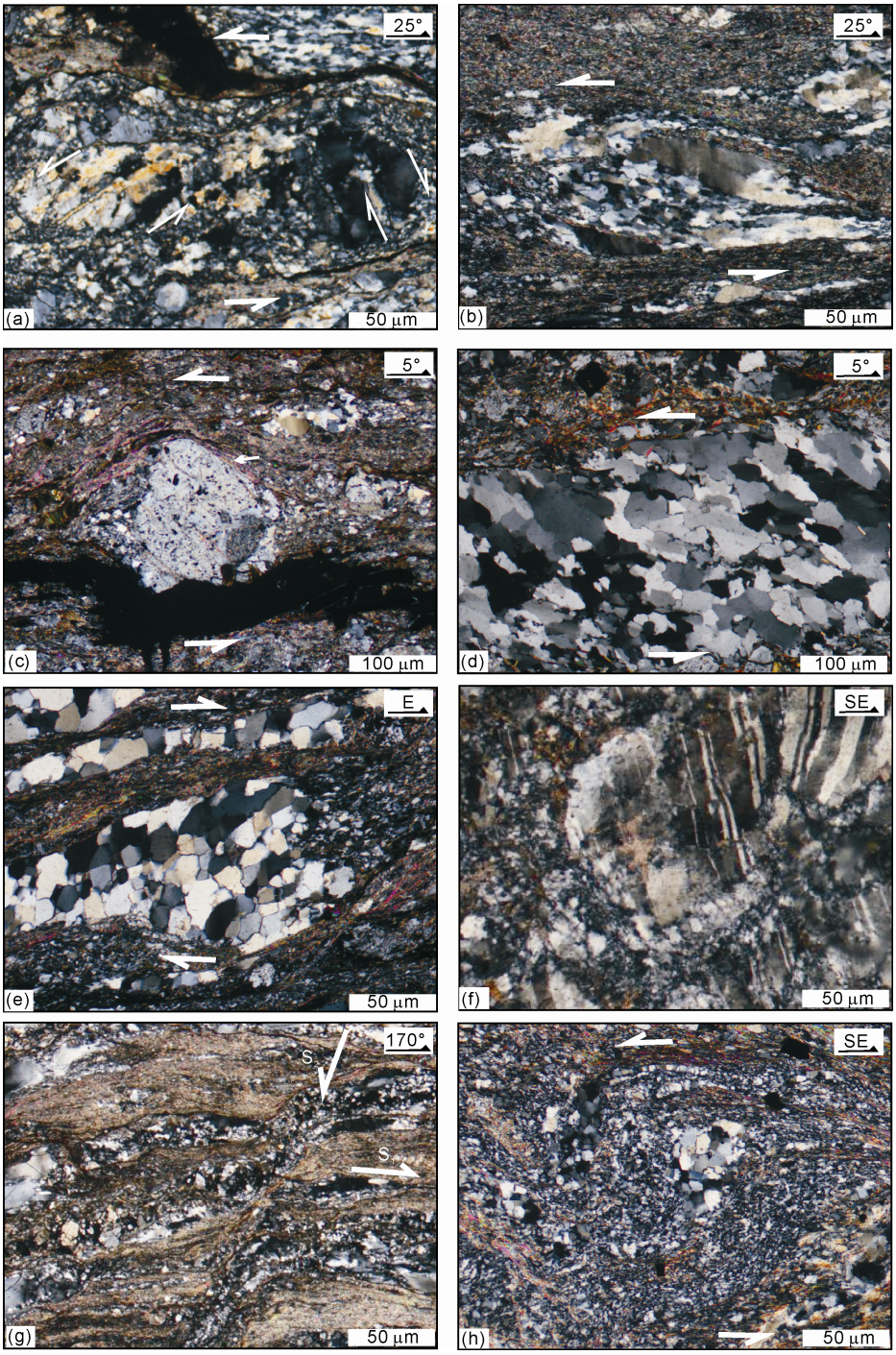

图 6　韧性剪切带常见显微构造特征

(a) Lp30, 斜长石斑晶穿晶破裂(碎裂作用), 构成混合书斜式构造, 示左行剪切及低温变形; (b) Lp30, 多晶石英集合体与云母的应变帽现象(晶质塑性变形、扩散物质迁移), 示左行剪切及中低温变形; (c) Lp32, 斜长石旋转碎斑(晶质塑性变形), 示左行剪切及中低温变形, 箭头所指的位置示应变帽; (d) Lp32, 石英斑晶的亚颗粒旋转重结晶, 亚颗粒边部低温颗粒边界迁移(晶质塑性变形), 示左行剪切、前期的中温变形及晚期的低温变形; (e) Lp6, 石英高温恢复动态重结晶(晶质塑性变形), 示右行剪切及中高温变形; 石英条带与绢云母构成显微分层现象; (f) Lp2, 长石的机械双晶、膨凸重结晶(晶质塑性变形)与晶内破裂, 示低温变形(原岩为早白垩世花岗岩); (g) Lp31, 早期面理(S_1)被晚期面理(S_2)切割叠加, 其中早期形成绢云母与石英条带的显微分层(粒间摩擦滑移), 前期中高温变形被后期为低温变形改造; (h) Lp40, 示多晶石英条带由于滑脱产生褶皱, 早期中高温变形被后期中低温变形所改造(样品号位置见图 2)

综合该地区显微构造所揭示的变形温度与剪切运动指向, 说明该地区经历了三次较大规模的韧性剪切活动. 即早期东西向韧性剪切带的中高温-右行走滑活动、中期北东向韧性剪切带中低温-左行剪切活动与晚期的低温-左行剪切活动.

4 韧性剪切带中石英结晶学优选特征

石英的变形及位错滑移实验表明, 石英的不同晶内滑移和优选方位(或组构)(CPO)模型形成在不同的温度条件下(Brunel 和 Maliakov, 1972; Hara 等, 1973; Mainprice 等, 1986). 嵇少丞(1988)提出在非同轴剪切应变下 4 种 CPO 模型: (1) 低温(<400℃)底面(0001)<a>组构模型; (2) 中低温(400~550℃)棱面(1011)<a>组构模型; (3) 中温(550~650℃)柱面(1010)<a>组构模型; (4) 高温(>650℃)柱面(1010)<c>组构模型. 其中, 低温组构可以叠加在早期高温组构之上, 在韧性剪切带中从高温向低温的演化过程可以形成复合的组构模型.

4.1 分析方法

研究选取了排山楼地区东西向、北东向韧性剪切带中 25 个标本进行了石英的 EBSD 组构测试与分析工作. 样品测试在中国地质大学(北京)岩石组构实验室进行. 按照垂直于叶理和平行于线理即 *XZ* 面切制标准光薄片, 并利用 0.002 μm 的硅胶悬浮液进行了精细的抛光. 晶格优选定向的测量设备是 Quanta200 环境扫描电镜和牛津的 HKL Channel 5 EBSD 探测器, 20 kV 的加速电压和 15 mm 的工作距离, 最后利用 CHANNEL5 软件对数据进行分析和处理(刘俊来等, 2008).

4.2 测试结果与分析

综合分析各个样品的组构特点, 排山楼地区很少有单一的极密或环带型组构类型, 多为叠加型组构, 体现了多期韧性剪切变形的特点. 对叠加型组构进行区分, 可以划分出两种叠加组构类型, 分别为点极密的叠加、点极密与环带的叠加(图 7).

4.2.1 点极密的叠加及其意义

样品 Lp1, Lp2, Lp5, Lp7, Lp23, Lp25, Lp26, Lp27, Lp37 和 Lp41 等均具有点极密叠加的特征. 该类样品多分布于东西向韧性剪切带中, 但通常临近于 NE 向延伸的脆性断层.

样品 Lp1 具体表现为Ⅷ型强极密与Ⅴ型微弱极密的叠加. Ⅷ型强极密为平行于 *X* 轴极密, Ⅴ型极密为平行于 *Z* 轴的极密. 上述极密类型说明至少经历了两期变形, 前期高温变形、后期低温变形. 前期高温(>650~700℃)条件下晶体通过柱面(10-10)<c>滑移完成的变形, 后期的晶体底面滑移代表了低温(<400℃)变形的叠加. 样品 Lp2, Lp41 显示了与 Lp1 相类似的特征.

样品 Lp5 具体表现为Ⅰ和Ⅶ型极密与Ⅴ型极密的叠加. Ⅰ型极密为平行于 *Y* 轴的极密. 在Ⅰ型极密的两侧逐渐过渡为Ⅶ型极密. 多组极密的存在显示了多期变形的叠加, 总体而言, 前期为中高温, 后期为中低温环境下的变形. 根据石英的 *C* 轴极密图, Ⅰ和Ⅶ型极密构成了一个长条状极密, 其倾斜方向可能代表后期受剪切改造影响, 即后期受到中低温左行剪切作用的改造. Lp26, Lp27 呈现与 Lp5 类似的特征.

除上述比较明显的两组极密的叠加外, Lp7, Lp23 和 Lp37 表现为相对较弱的点极密叠加. 其中, Lp7 表现为较弱的Ⅷ型极密(高温柱面(10-10)<c>)与较强的Ⅴ型极密(低温底面(0001)<a>)的叠加, Lp23 为一组较强的Ⅴ型极密与较弱的Ⅱ型极密(中低温(1011)<a>滑移) 的叠加; Lp37 为两组以 *X* 轴为对称轴的极密叠加, 其中一组极密明显, 显示了中高温条件下的柱面<a>滑移的重要作用.

4.2.2 点极密与环带的叠加及其意义

样品 Lp6, Lp8, Lp11, Lp24, Lp28, Lp29, Lp30, Lp31, Lp32, Lp33, Lp35-1, Lp35-2, Lp36, Lp39 和 Lp40-2 等均表现为点极密与环带的叠加. 该类样品多数分布于东西向剪切带与 NE 向剪切带交汇处.

该类型中点极密除了Ⅷ型未见外, 其他的极密均有发育, 其中以Ⅰ型(柱面<a>滑移)、Ⅱ型点极密(菱面<a>滑移)与环带的叠加为主, 总体显示了中高温变形、中低温与低温变形等多期变形的特点; 环带类型多为Ⅰ型, 但环带并不具备斜方对称的特点, 显示了简单剪切作用对环带的改造非常明显.

样品 Lp6 为Ⅰ型环带叠加了Ⅱ型及Ⅲ型极密, 环带向左偏转显示了后期遭受了左行剪切作用, 并在基圆上形成低温极密, 说明左行剪切作用是在低温条件下进行的. 环带的开角为 80°, 显示早期剪切变

形时的温度为(600±50)℃, 基圆上Z轴附近有一极密, 显示了后期的低温(<400℃)变形.

样品 Lp8, Lp28, Lp33 和 Lp35-2 等Ⅰ型环带的开角均为 80°~85°, 另有 Lp39, Lp40-2, Lp29-1 和 Lp24 等开角为 90°左右, 显示了变形温度在(630±50)℃, 总体来说, 大部分样品早期经历了(600±50)℃的中、高温变形阶段. 另有少量样品的环带开角为 65°左右, 变形温度在(500±50)℃左右, 这和部分样品具有Ⅱ型以及Ⅳ和Ⅶ极密所代表的温度是一致的, 反映了中、低温变形的特点; 除上述中高温、中低温变形外, 后期还经历了低温(<400℃)变形.

综合以上对 25 块样品的石英 EBSD 组构的解析, 叠加组构类型体现了多期韧性剪切变形的地质历史, 不论叠加类型为点极密与点极密抑或点极密与环带的叠加, 均体现了前期高温或中高温变形、中期中低温变形、后期低温变形等不同温度、不同构造层次变形的特点.

石英 EBSD 组构除了反映不同时期的变形温度, 还部分保留了韧性变形时的剪切指向. 早期中高温变形时Ⅰ型环带多向右侧倾斜, 显示早期高温变形时伴随右行剪切作用; 中、后期的中低温及低温变形的极密显示强极密多位于Z轴左侧或向左偏转, 显示中、后期中-低、低温变形主要表现为左行剪切. 由此可见, 通过石英的EBSD组构测试得出石英结晶学优选与显微构造特征相吻合.

5 讨论

5.1 韧性剪切带构造活动期次与性质

韧性剪切带是排山楼金矿区最重要的构造型式, 前人曾对其局部构造特征进行了研究(王安建等, 1996; 骆辉和赵运起, 1997). 本次通过对韧性剪切带的宏观、显微及超微构造的系统研究表明, 该地区存在三次较强的韧性剪切活动.

东西向剪切带早于北东向剪切带的形成已是共识(李俊建等, 2001; 张晓晖等, 2002). 野外面理与线理的观测与统计表明(图 2 和 4), 东西向韧性剪切带早期存在强烈的右行剪切作用, 剪切作用一方面形成了大量糜棱岩、千糜岩等构造岩, 另一方面对尖山岩体(γ_1^2)进行了强烈的改造, 形成巨大的"σ"形(图 2). 采自东西向韧性剪切带的样品显微构造特征及石英结晶学优选(CPO)特征表明, 早期的右行剪切活动形成于较深的地壳层次及中高温的环境下, 代表性的显微构造现象包括大量的多晶石英条带与云母的显微构造分层等; 石英极密类型以Ⅰ和Ⅷ型极密或开角近 90°的Ⅲ型极密为主要特征.

第二期韧性剪切活动体现为北东向韧性剪切带的形成, 切割了部分前期形成的东西向韧性剪切带. 该剪切带的形成可能代表了一次强烈的挤压变形事件, 而不是前人认为的走滑-伸展变形(王安建等, 1996). 野外观测表明, 早期形成的糜棱岩遭受 NW-SE 向的挤压作用形成了大量的柔流褶皱(图 5(b))与牵引构造. 野外考察显示牵引褶皱转折端的张裂隙被石英脉所充填(图 5(d)). 二道沟-上两家子地区北东向韧性剪切带发育了一些倾伏向 NE-NNE 的拉伸线理可能与此次韧性剪切作用有关(图 2), 该条剪切带上的线理与靳家店-排山楼剪切带的拉伸线理优选方位存在明显的不协调性, 指示这两条北东向韧性剪切带的性质存在差异. 此次韧性剪切活动的构造层次理应浅于前期, 在显微构造上更多地表现为多晶石英集合体, 而未见多晶石英条带. 石英亚晶粒的旋转方向指示其经历了左行剪切活动(图 6(c)和(d)); 石英结晶学优选以Ⅱ, Ⅳ和Ⅶ型及开角为近 80°的Ⅲ型极密为主(图 7), 指示该期左行压扭活动形成于中低温环境及中浅层地壳层次.

第三期韧性剪切作用体现为北东向韧性剪切带的走滑–伸展作用, 以脆-韧性变形为主. 该期韧性剪切活动可能迁就了前期已经形成的北东向韧性剪切带, 以靳家店-排山楼剪切带为代表, 在野外主要体现为正滑作用为主, 局部可见左行走滑, 伴随了阜新盆地及一系列 NE-SW 走向延伸正断层的形成, 应形成于较浅的地壳层次. 显微构造显示后期的正滑作用切割了早期形成的叶理(图 6(g)); 早期代表中高温的多晶石英条带及中低温的石英多晶集合体在正滑作用下, 形成滑脱褶皱(图 6(h)); 该期韧性剪切形成了大量的低温变形组构, 如石英的膨凸重结晶、低温颗粒边界迁移、长石的晶内破裂(图 6(f))等. 具有代表性的显微构造现象是中期韧性剪切作用形成的多晶石英集合体亚晶粒边部的低温颗粒边界迁移及膨凸重结晶的形成(图 6(d)), 显示中低温变形后遭受了低温韧性剪切的改造作用. 石英的结晶学优选方位以Ⅴ型极密、开角近 60°的Ⅲ型极密为代表, 显示该期变形形成于低温、较浅的地壳层次. 该期韧性剪切

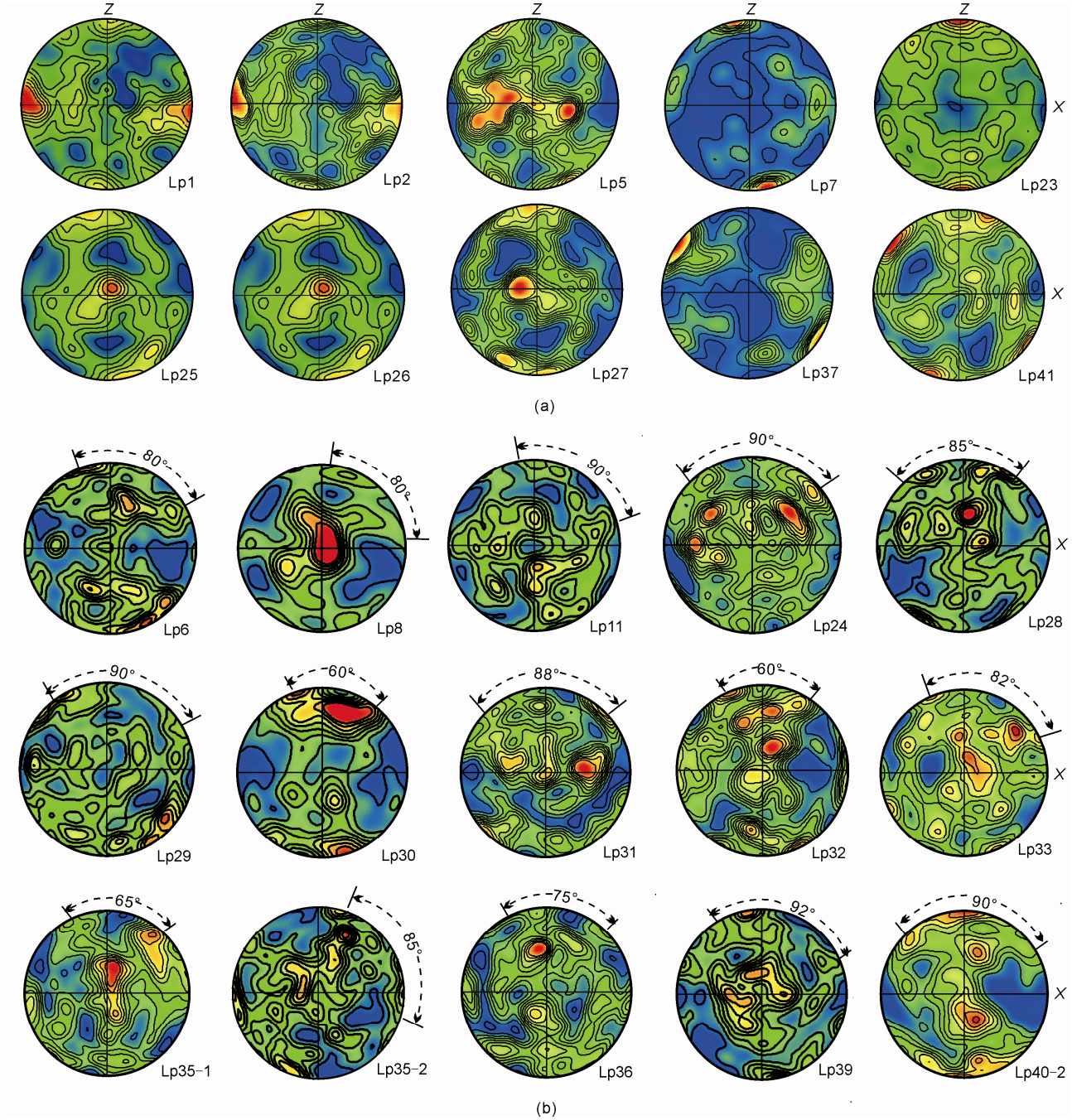

图 7　韧性剪切带中石英结晶学优选特征

(a) 点极密的叠加; (b) 点极密与环带的叠加(样品位置见图 2)

可能伴随着大量的碳酸盐化、黄铁矿化、绢云母化和硅化, 具体表现为镜下可见大量方解石脉的机械双晶、部分黄铁矿颗粒的脆-韧性变形等, 表明伴随该期韧性剪切活动, 大量含矿流体从深部沿剪切带进入储集空间, 先形成的矿物颗粒在持续的剪切活动中遭受韧性或脆-韧性剪切改造. 对排山楼金矿三种流体包裹体的均一温度测试表明, 成矿 *P-T* 值的范围为 140~190 MPa 和 322~417℃(Zhang 等, 2005), 与显微

构造、石英 EBSD 组构测试显示的温度相吻合.

5.2 韧性剪切带构造活动背景与演化过程

前人对排山楼矿区韧性剪切带内岩石、岩体等进行了一系列的年代学测试, 从而为韧性剪切带的构造活动提供了年代学依据.

对含金石英细脉矿石中的石英测定, 获得了(2105.2±10.4) Ma 的 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄, 认为成矿及东西向韧性剪切带形成于吕梁期(李俊建等, 2001). 由于该地区存在多期硅化现象, 多期石英相互交织, 该石英样品可能不能真正代表东西向韧性剪切带的年龄. 对东西向韧性剪切带的绿帘二云斜长质糜棱岩的含钾矿物的测试, 获得了(219±4) Ma 的 ^{40}Ar-^{39}Ar 坪年龄(张晓晖等, 2002), 由于该样品的年龄谱特征基本无扰动, 是一次构造事件的年龄, 可能更适合代表东西向韧性剪切带的形成年龄. 该时期蒙古带与华北太古宇克拉通沿索伦-林西缝合带拼合(Xiao 等, 2003), 形成了华北地块, 在缝合带南部形成了广泛的构造变形、冲断褶皱、逆掩及韧性剪切变形, 并形成了一系列年龄值在 285~217 Ma 的岩体(Davis 等, 1998; 邵济安等, 2000; 郑亚东等, 2000; Davis 等, 2002; 张拴宏等, 2010; 邵济安和杨进辉, 2011). 该年龄早于辽东地区东西向变形的时间, 后者被认为形成于 200~190 Ma(陈荣度等, 1999; 王宗秀等, 2000a, 2000b; 李三忠等, 2004), 是华南与华北板块碰撞以及法拉隆板块俯冲作用的结果(李三忠等, 2004).

第二期韧性剪切活动时间前人尚无明确的报道, 也缺乏确切的 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄, 该期韧性剪切活动以二道沟-上两家子韧性剪切带形成为代表, 可能与张宏(2004)报道的医巫闾山中生代两期韧性变形的第一期一致. 从区域上看, 该期变形可能与李三忠等识别的辽东地区第二暮构造变形相似(李三忠等, 2004), 其左行压扭的构造性质与该地区乃至辽西地区燕山早、中期处于挤压的大地构造背景性质比较类似, 可能代表了燕山陆内造山带主造山期造山作用的记录. 医巫闾山花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年得出了 2500, 224 和 161 Ma 等 3 个时间段年龄值(杜建军等, 2007). 其中, 224 Ma 与第一期韧性剪切活动的年龄 219 Ma 接近, 代表了该地区早期印支运动的年龄; 161 Ma 的岩浆侵位年龄与(Li 等, 2004; 李三忠等, 2004; Li 等, 2007)报道的胶辽地块中古元古代地质体经历重熔事件的时代一致(~160 Ma), 可能代表了胶辽地块基底经历强烈的中生代再造作用年龄. 吴福元(2006)曾对辽西东南部中生代花岗岩时代进行了系统地研究, 对医巫闾山中心岩体进行的锆石 U-Pb 同位素测年, 得出了 153~163 Ma 的岩浆结晶年龄, 及(2539±14), (216±7)和(187±6) Ma 等多组 ^{206}Pb/^{238}U 加权年龄, 这些年龄值与杜建军(2007)得出的年龄基本一致. 野外考察表明, 二道沟-上两家子韧性剪切带被侏罗纪侵入岩体侵入, 表明剪切带形成早于或同期于岩体侵位事件. 综合分析来看, 该期韧性剪切带大致形成时间可能为~160 Ma, 与胶辽地块内的重熔事件时间接近(李三忠等, 2004), 略早于辽东地区 153~145 Ma 的挤压变形事件(Li 等, 2004)的时间.

第三期韧性剪切活动具有走滑-伸展的性质, 以排山楼-靳家店韧性剪切带的形成为代表, 区域上可能作为瓦子峪拆离断层活动的一部分. 韧性剪切带内两块糜棱岩的 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄分别为(116±2)和(127±3) Ma(张晓晖等, 2002), 变形岩浆岩锆石 SHRIMP 定年得出了 124 Ma 左右的年龄(罗镇宽等, 2001), 该期韧性变形的形成与医巫闾山变质核杂岩的剥露、阜新盆地的形成具有相同的时间(Darby 等, 2004; Li 等, 2012), 与其东部辽南变质核杂岩的剥露时间也较一致(Liu 等, 2005, 2006), 可能代表了 130~120 Ma 期间华北克拉通岩石圈大规模减薄作用在该地区的浅层响应.

基于以上分析, 我们建立了排山楼韧性剪切带演化过程(图 8).

(1) ~219 Ma, 受印支运动影响, 东西向韧性剪切带形成, 该期韧性剪切活动处于中高温及较深的构造层次, 以右行剪切为主, 形成了以多晶石英条带与云母的显微分层现象为代表的显微构造, 石英的结晶学优选显示石英以柱面<a>或柱面<c>滑移为主.

(2) ~160 Ma, 燕山运动早期的推覆作用对前期韧性剪切带进行了叠加改造, 岩石的叶理化进一步加强, 形成二道沟-上两家子 NE-SW 向延伸的韧性剪切带, 该期韧性剪切以左行压扭为主, 形成于地壳中浅层次及中低温环境, 形成以多晶石英集合体、石英亚颗粒旋转重结晶等为主的显微构造现象, 石英的结晶学优选显示石英<a>以菱面滑移为主.

(3) 130 ~120 Ma, 燕山中期伸展构造运动形成了的以排山楼-靳家店为代表的北东向韧性剪切带, 韧

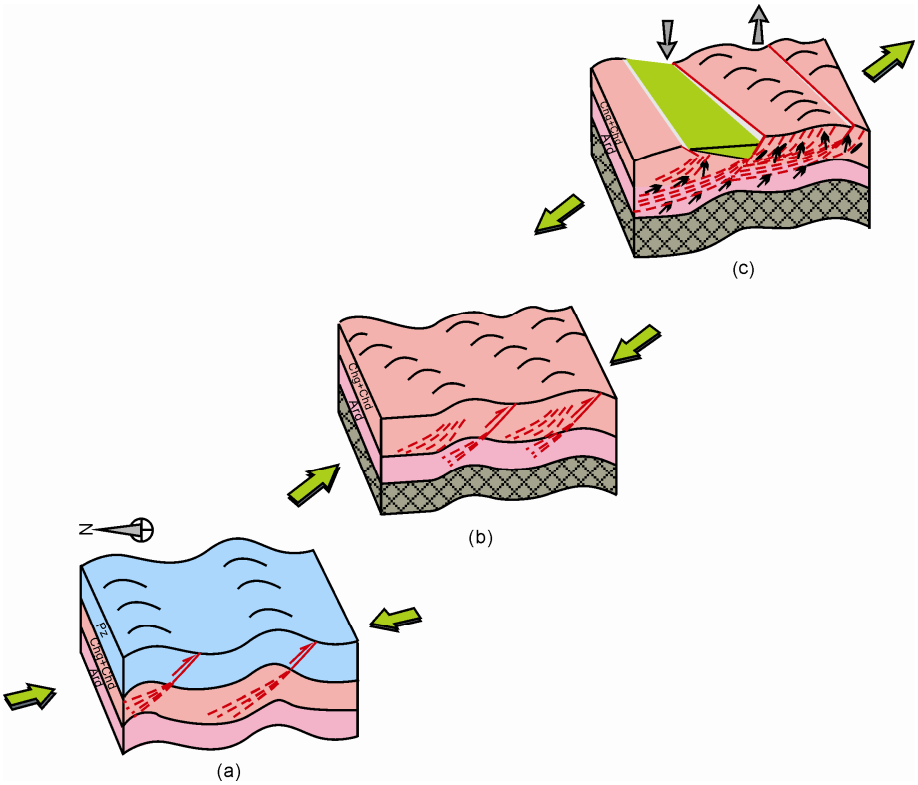

图 8　排山楼韧性剪切带构造演化模式

(a) ~219 Ma, 伴随右行压扭作用, 东西向韧性剪切带形成; (b) ~160 Ma, 伴随左行压扭作用, 北东向韧性剪切带形成, 并切割部分东西向韧性剪切带(以二道沟-上两家子北东向韧性剪切带为代表); (c) 130~120 Ma, 伴随左行走滑、拆离伸展作用及医巫闾山的隆升, 排山楼-靳家店北东向韧性剪切带形成, 二道沟-上两家子韧性剪切带遭受低温韧性改造. 图例见图 1

性剪切带作为医巫闾山变质核杂岩拆离断层带的一部分, 迁就了先存的 NE 向延伸的剪切带, 该期剪切活动伴随着阜新盆地、医巫闾山变质核杂岩的形成与剥露, 形成于较浅的地壳层次, 代表性显微构造现象有石英的低温颗粒边界迁移、膨凸重结晶和方解石机械双晶等, 石英结晶学优选显示石英以底面<a>滑移为主. 该期走滑-伸展运动可能使深部含矿热液上升并就位于前期形成的叶理中, 形成脉状金矿床.

6　结论

基于野外地质调查、室内显微构造及石英 EBSD 组构分析等综合研究, 得出如下结论.

(1) 排山楼金矿区发育三期韧性剪切活动, 并形成了东西向、北东向延伸的韧性剪切带. 前者主要表现为右行压扭活动, 后者切割了前者, 先后经历了左行压扭、左行走滑–伸展等多期构造活动.

(2) 东西向韧性剪切带中大量发育多晶石英条带与云母的显微构造分层现象, 形成于较深的地壳层次及中高温的环境下, 石英结晶学优选(CPO)表明石英以柱面<a>、柱面<c>滑移为主. 该剪切带可能形成于印支期, 是蒙古带与华北太古宇克拉通沿索伦–林西缝合带拼合作用在排山楼地区的一种构造表现.

(3) 北东向韧性剪切带早期的韧性剪切活动可能发生于约 160 Ma, 是燕山运动早期活动的结果, 该期韧性剪切形成于中低温环境及中浅层地壳层次, 显微构造以多晶石英集合体、石英的亚颗粒旋转重结晶为代表, 石英以菱面<a>滑移为主; 晚期的韧性剪切以脆-韧性剪切为主, 主要表现为低温变形, 发育大量石英低温颗粒边界迁移和膨凸重结晶等显微构造, 形成于地壳较浅层次, 其形成可能与 130~120 Ma 期间华北克拉通岩石圈大规模减薄作用有关. 该期韧性剪切活动可能直接导致了排山楼金矿床的形成.

参考文献

陈荣度, 李显东, 杨雅君, 等. 1999. 辽东半岛南部印支造山旋回早期的顺层滑脱构造. 辽宁地质, 16: 161–169

Darby B J, Davis G A, Xiao H Z, 等. 2004. 辽西医巫闾山地区瓦子峪变质核杂岩的厘定. 地学前缘, 11: 145–155

杜建军, 马寅生, 赵越, 等. 2007. 辽西医巫闾山花岗岩锆石 SHRIMPU-Pb 测年及其地质意义. 中国地质, 34: 26–33

胡玲, 刘俊来, 纪沫, 等. 2009. 变形显微构造识别手册. 北京: 地质出版社. 1–96

嵇少丞. 1988. 部分熔融的构造地质意义(1): 变形机制转变的实验研究. 地质科学, 23: 347–356

李达, 韩雪梅. 1995. 排山楼金矿地质特征及成矿模式初探. 贵金属地质, 4: 109–117

李俊建, 沈保丰, 骆辉, 等. 2001. 辽宁阜新排山楼金矿的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 成矿年龄. 地质科学, 36: 107–111

李三忠, 刘建忠, 赵国春, 等. 2004. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约——以胶辽地区为例. 岩石学报, 20: 633–646

刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 等. 2008. 岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用. 地质通报, 27: 1638–1645

罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 2001. 辽宁阜新排山楼金矿区岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其意义. 地球化学, 30: 483–490

骆辉, 赵运起. 1997. 辽宁阜新排山楼金矿地质和成矿作用. 前寒武纪研究进展, 20: 13–24

孟宪刚, 冯向阳, 邵兆刚, 等. 2002. 辽西医巫闾山变质核杂岩构造系统及其对金矿的控制. 地质通报, 21: 841–847

曲亚军, 高殿生, 贾云伟, 等. 1992. 排山楼金矿床的蚀变特征. 辽宁地质: 45–52

邵济安, 韩庆军, 李惠民. 2000. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现. 中国科学 D 辑: 地球科学, 30: 148–153

邵济安, 杨进辉. 2011. 记载了早中生代壳幔演化的赤峰-凌源地质走廊. 岩石学报, 27: 3525–3534

时信忠. 1991. 排山楼韧性剪切带糜棱岩中的黑云母压象. 辽宁地质: 378–379

孙守恪, 刘红涛, 褚少雄. 2012. 辽宁省排山楼矿区二长花岗岩成因及其与金矿化的关系. 岩石学报, 28: 607–618

王安建, 李树勋, 曲亚军, 等. 1996. 脉状金矿地质与成因-以辽西地区为例. 长春: 吉林科学技术出版社. 1–138

王汉霞, 李世涛. 1988. 辽宁西部两条大型韧性剪切带及其地质意义. 辽宁地质: 235–244

王荣湖, 金成洙, 李景春. 2008. 排山楼金矿床 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄及其地质意义. 东北大学学报(自然科学版), 29: 1482–1485

王宗秀, 唐哲民, 杨中柱, 等. 2000a. 大连地区的中生代韧性构造变形. 地震地质, 22: 379–386

王宗秀, 唐哲民, 杨中柱, 等. 2000b. 大连地区中-新生代构造格架厘定. 中国区域地质, 19: 120–126

吴春林. 1992. 排山楼金矿床的发现及其地质特征. 黄金地质科技, 19: 73–77

吴春林, 孙厚江. 1996. 排山楼地区金矿控制条件分析. 黄金地质, 2: 28–32

吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 等. 2006. 辽西东南部中生代花岗岩时代. 岩石学报, 22: 315–325

张宏, 王五力, 李之彤, 等. 2004. 辽西医巫闾山地区中生代两期韧性变形的研究. 世界地质, 23: 213–220

张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 2010. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. 岩石矿物学杂志, 29: 824–842

张晓晖, 李铁胜, 蒲志平. 2002. 辽西医巫闾山两条韧性剪切带的 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄: 中生代构造热事件的年代学约束. 科学通报, 47: 697–701

张耀华, 谷振东, 陈为民. 1993. 阜新排山楼金矿金的赋存状态. 辽宁地质: 129–138

郑亚东, Davis G A, 王琮. 2000. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题. 地质学报, 74: 14

Brunel M, Maliakov Y. 1972. Utilisation de I′orientation preferentielle du quartz comme marqueur de la deformation hercynienne dans le granite prehercynien du Mendic (Massif Central francais). C R Acad Sci Paris, 274: 2627–2630

Davis G A, Cong W, Yadong Z, et al. 1998. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of northern China: New views on its intraplate contractional styles. Geology, 26: 43–46

Davis G A, Darby B J, Zheng Y D, et al. 2002. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. Geology, 30: 1003–1006

Hara I, Takeda K, Kimura T. 1973. Preferred lattice orientation of quartz in shear deformation. J Sci Hiroshima Univ, 7: 1–11

Li G, Liu Z, Li S, et al. 2012. Crustal thinning during Mesozoic extensional detachment faulting in the Yiwulüshan region, eastern North China Craton. Int Geol Rev, 55: 749–766

Li S Z, Zhao G C, Sun M. 2004. Mesozoic, not Paleoproterozoic SHRIMP U-Pb zircon ages of two Liaoji Granites, eastern block, North China craton. Int Geol Rev, 46: 162–176

Li S Z, Kusky T M, Zhao G, et al. 2007. Mesozoic tectonics in the eastern block of the North China Craton: Implications for subduction of the Pacific plate beneath teh Eurasian plate. Geol Soc Spec Publ, 280: 171–188

Liu J L, Gregory A D, Lin Z Y, et al. 2005. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. Tectonophysics, 407: 65–80

Liu J L, Guan H M, Ji M, et al. 2006. The Liaonan metamorphic core complex: Constitution, structure and evolution. Acta Geol Sin, 80: 502–513

Mainprice D, Bouchez J L, Blumenfeld P, et al. 1986. Dominant c slip in naturally deformed quartz: Implications for dramatic plastic softening at high temperature. Geology, 14: 819–822

Passchier C W, Trouw R A J. 1996. Microtectonics. Berlin: Springer-Verlag. 25–253

Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, et al. 2002. The eastern Tonale fault zone: A 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700℃. J Struct Geol, 24: 1861–1884

Xiao W, Windley B F, Hao J, et al. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. Tectonics, 22: 1069–1088

Zhang X, Liu Q, Ma Y, et al. 2005. Geology, fluid inclusions, isotope geochemistry, and geochronology of the Paishanlou shear zone-hosted Gold Deposit, North China Craton. Ore Geol Rev, 26: 325–348